

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.016

基于互联网监控的焦化废水处理研究

杨宗政^{1,2,3}, 张天宇², 王元培², 田琪², 曹井国^{1,2,3}, 郭越²

(1. 天津科技大学 化工与材料学院, 天津 300457; 2. 天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457; 3. 天津市卤水化工与资源生态化利用重点实验室, 天津 300457)

摘要: 采用膜生物反应器(MBR)处理模拟焦化废水,驯化活性污泥,并考察水力停留时间(HRT)和溶解氧(DO)浓度等工艺参数对污染物去除效果的影响,构建互联网监控系统对工艺装置的运行进行监测与控制。结果表明,经过70 d的培养驯化,MBR中的MLSS增长至2.3 g/L,污泥沉降比(SV₃₀)由1%增长至34%并保持稳定,COD、UV₂₅₄等出水指标稳定达标。在进水COD为810 mg/L、UV₂₅₄为5.0 cm⁻¹的条件下,当HRT为10 h、DO为3.0~3.5 mg/L时,COD和UV₂₅₄去除率分别可达到100%和91%。互联网监测数据显示,出水COD与氧化还原电位(ORP)具有较强相关性,为此采用多元线性回归方法提出了ORP预测模型,该模型准确度较高、稳定性较好,可用于该工艺运行过程的管理,实现远程控制。

关键词: 焦化废水; 膜生物反应器; 污泥驯化; 互联网监控; 云平台

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0098-08

Treatment of Coking Wastewater Based on Internet Monitoring

YANG Zong-zheng^{1,2,3}, ZHANG Tian-yu², WANG Yuan-pei², TIAN Qi²,
CAO Jing-guo^{1,2,3}, GUO Yue²

(1. College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Brine Chemical Engineering and Resource Eco-utilization, Tianjin 300457, China)

Abstract: The membrane bioreactor (MBR) was applied to treat the simulated coking wastewater and domesticate the activated sludge. The effects of the process parameters such as hydraulic retention time (HRT) and dissolved oxygen (DO) on the removal of the pollutants were investigated, and an internet monitoring system was constructed to monitor and control the operation of the equipment. After 70 days of cultivation and domestication, the MLSS in the MBR increased to 2.3 g/L, the sludge volume (SV₃₀) increased from 1% to 34% and then tended to be stable, and the water quality index of the effluent such as COD and UV₂₅₄ were stable and reached the national discharge standard. Under the conditions of influent COD of 810 mg/L and UV₂₅₄ of 5.0 cm⁻¹, the removal efficiencies of COD and UV₂₅₄ were 100% and 91%, respectively, when the HRT and DO were 10 h and 3.0-3.5 mg/L. The internet monitoring data showed that the COD and oxidation-reduction potential (ORP) in the effluent were strongly correlated with each other. Therefore, a model for predicting ORP was proposed by using

multiple linear regression methods. The model had higher accuracy and good stability, and could be used to manage the process and realize remote control.

Key words: coking wastewater; membrane bioreactor; sludge domestication; internet monitoring; cloud platform

焦化废水主要是炼焦、煤气净化和焦化产品回收过程中产生的工业废水,毒性高,组分复杂,含有大量的苯酚类、联苯、吡啶和喹啉以及多环芳烃等有机污染物,属于较难生化降解的高浓度有机工业废水^[1-2]。由于焦化废水可生化性差,较难分解,一旦处理不达标,会给环境造成很大的污染。

我国焦化废水处理厂多采用生化法处理工艺,但最终出水 COD 等指标很难达标^[3]。目前研究较多集中在焦化废水深度处理方面,国内外普遍采用臭氧氧化法、铁碳微电解法、芬顿试剂氧化法、膜生物反应器(MBR)、光催化氧化、纳滤、反渗透膜分离和树脂吸附法等对焦化废水进行深度处理^[4-5]。其中,MBR 因其能够将水力停留时间(HRT)与污泥停留时间(SRT)分离,且具有工艺简单高效、耐冲击负荷等优点,在焦化废水深度处理中应用较为广泛^[6]。由于焦化废水生物毒性强、环境危害大,而基于互联网的远程监控可以有效防范现场污染物的危害,同时,物联网和大数据技术尚未广泛应用于污水处理过程,我国部分污水处理厂仅能实现在线监测,还不能实现远程交互,而自动化智能控制是国内外污水处理系统发展的必然趋势^[7-8]。通过智能一体化精细管理,可有效促进系统融合,降低运营成本,有效解决污水站的节能降耗问题,具有广阔的应用前景^[9]。鉴于此,笔者选取焦化废水好氧池出水典型特征污染物配制模拟废水,对 MBR 的启动过程、运行参数进行深入研究分析,简化工艺流程并结合互联网技术构建监控系统,以为 MBR 工艺深度处理焦化废水的工程设计提供参考。

1 材料与方 法

1.1 实验装置

本研究采用基于互联网的焦化废水监控型膜生物反应器,实验装置如图 1 所示。MBR 反应器为有机玻璃材质,池体尺寸为 1.1 m × 0.175 m × 0.175 m,有效容积为 31.3 L。原水经过进水泵进入 MBR 池,反应器布设 4 个曝气器,通过气泵供气,使用流量计控制进气量,实现泥水的充分混合。使用中空纤维微滤膜(天津膜天膜公司)实现泥水分离,有效

膜面积为 0.25 m²,膜通量为 12.5 L/(m² · h),采取恒流量的工作方式,工作压力为 5 kPa。在 MBR 池和出水池分别布设 pH、DO、液位和氧化还原电位(ORP)传感器,与数据传输系统、云服务器共同构成硬件系统,实时在线采集 pH 值、DO 和 ORP 等参数,传感器采用有线传输方式,输出 4 ~ 20 mA 模拟信号,经 AI 输入模块收集至数据采集平板,数据传输系统采用 INGE86622 - V1 通信模块,由主控模块、模拟量输入/输出模块、开关量输入/输出模块、功能化模块、电源等构成,电源外接 24 V 直流电,并通过网络进行信号的远端传输。“智慧污水测控系统”是新一代基于物联网技术的远程污水处理监控系统,该系统采用 Python 语言开发,如图 2 所示。

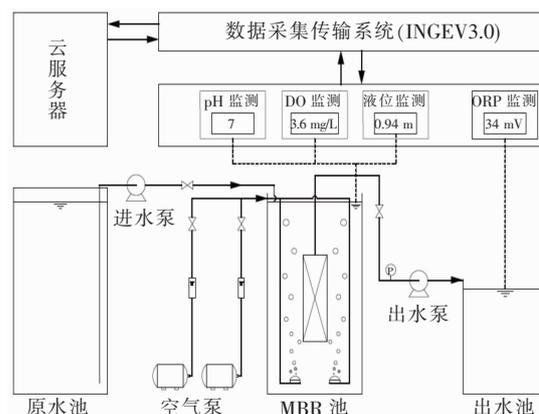


图 1 基于互联网监控的焦化废水 MBR 处理装置

Fig. 1 MBR device for coking wastewater treatment based on internet monitoring



图 2 智慧污水测控系统

Fig. 2 Intelligent sewage monitoring and control system

服务器配置如下:CPU(PIV 2.0 GHz)、内存(1

GB)、硬盘(60 GB)。软件系统:云计算处理采用阿里云-飞天开发性平台,实现数据的及时高效分析处理;软件开发环境:Linux Ubuntu/CentOS;软件使用环境:Windows/MacOX/Linux。数字信号经过分析处理后作出调控反馈,实现焦化废水膜生物反应器的在线监控。

1.2 实验用水

实验用水为人工配水,其成分包括:50~160 mg/L 苯酚、50~160 mg/L 喹啉、50 mg/L 吡啶、10~12 mg/L 氯化铵、20~22 mg/L 磷酸二氢钾;运行阶段 COD、氨氮、总氮、总磷分别维持在 800、3、20、3 mg/L 左右。

1.3 实验方法

接种污泥取自唐山某焦化废水处理厂好氧池和西部新城污水处理厂好氧池。在污泥培养驯化初期,向 MBR 池内投加课题组前期筛选的焦化废水高效处理菌株,MBR 池温度设置为 18~30 ℃,pH 值为 6.0~8.0,每天投加 300 mg/L 当量的 COD 和相应比例的营养物质,随后按比例增加进水 COD 浓度(300、400、500、600、700、800 mg/L)。自第 10 天开始连续进出水,HRT 设置为 10 h,每天测定 COD、UV₂₅₄、MLSS 浓度。出水 COD 和 UV₂₅₄ 值分别小于 50 mg/L 和 0.5 cm⁻¹即为达标。经过 70 d 的启动期,污泥培养驯化完成,驯化过程中根据 MBR 池的 DO 浓度和液位变化控制鼓风机启闭以控制曝气量,通过调节进出水泵的转速来控制 HRT,考察反应器的处理效果,并确定最优工艺条件。

根据 MBR 工艺参数构建“互联网+”焦化废水处理监控系统,设计一套基于互联网的数据采集、传输、解析、分析、处理的架构,并通过硬件系统设备的连接和调试,保证设备运行的稳定性;开发基于互联网的智慧污水测控软件,并研发相关配套软件,通过云端服务实时推送预警信息,实现远程监控功能,并对互联网监测数据进行分析,统计传感器数据与实际水质监测数据,分析指标间的相关性,构建模型算法;通过互联网终端智能云平台,实时监测装置设备的运行状态,信息可在固定端和移动端显示,进一步优化系统,保证反应器运行稳定。

1.4 分析项目与方法

COD、NH₄⁺-N、TP、TN、MLSS、污泥容积指数(SVI)、污泥沉降比(SV₃₀)均采用国家标准方法测定,UV₂₅₄采用紫外分光光度计测定,DO、液位、

ORP、pH 值等均采用传感器在线监测。

2 结果与讨论

2.1 MBR 对焦化废水的处理效果

2.1.1 启动期的出水效果

MBR 启动过程中污泥的 SVI、SV₃₀、MLSS 随时间的变化如图 3 所示。启动初期,在 MBR 反应器中投加接种污泥进行曝气扩大培养,这期间不排泥。启动初期 MLSS 为 0.631 g/L,启动 15 d 后,通过连续进水,MLSS 上升至 1 g/L 以上,随后通过提高进水 COD 浓度增大微生物的生长量,经过 70 d 的连续培养,污泥浓度维持在 2.3 g/L 左右。

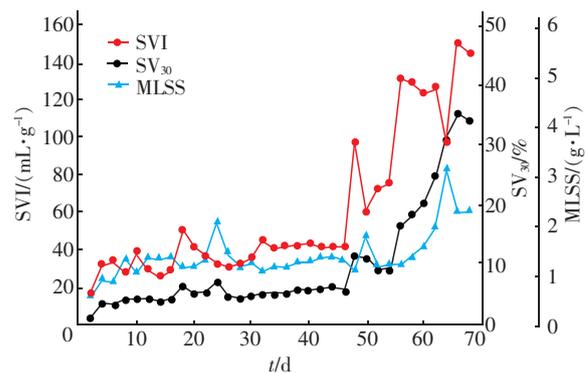


图3 MBR 启动期间污泥参数的变化

Fig. 3 Change of sludge parameters during MBR start-up

启动初期,由于 MBR 池内的高效菌群处于适应期,并未形成菌胶团絮体,SV₃₀ < 1%。经过 7 d 的驯化培养,SV₃₀ 升高至 4%,MBR 池内由乳白色变为黄色,说明菌群开始大量生长繁殖,并且形成小颗粒的菌胶团;随着驯化的进行,污泥逐渐生长,在 21~28 d 期间,SV₃₀ 由 7% 下降至 4%,而此时 MLSS 也由 2.0 g/L 下降至 1.2 g/L,分析原因为该浓度下进水有机物含量低,相同时间内微生物自身氧化消耗量大于自身增殖量,此时采取的措施是梯度提高进水有机物浓度,增大 COD 浓度至 800 mg/L;45 d 之后,污泥量逐渐增加,SV₃₀ 升高至 34% 左右,并维持稳定。启动初期,SVI 值为 18 mL/g,说明污泥正处于生长适应期,污泥粒细小无絮体,此时的污泥活性很低,随着驯化的进行,污泥逐渐增殖,SVI 值逐渐升高。45 d 之后,SVI 值迅速上升,在 60~150 mL/g 范围波动,在此期间出现活性污泥膨胀现象,但有大量菌胶团大颗粒形成,污泥的活性有所提高,且水质并未受到污泥膨胀的影响。

MBR 启动期间对 COD 的去除效果见图 4。可知,在 70 d 的连续驯化过程中,COD 进水负荷逐渐

升高, COD 去除效果良好, 出水浓度可以达标。启动初期, COD 去除率达到最大值 96.0%, 此时微生物处于增殖期, 溶解氧充足, pH 值能够维持微生物的生长需求, 出水效果较好。第 10~16 天期间, 出水 COD 浓度升高, COD 去除效果下降。分析原因为, 当 pH 值降至 7.0 以下时, 由于该环境不适宜硝化菌的生长, 硝化作用减弱, 碳源消耗量降低, 造成 COD 的去除率略有下降^[10]。从第 20 天开始, pH 值逐渐回升至 7 左右, 出水 COD 值逐渐趋于稳定, COD 去除效果较好。26 d 后, 按比例逐渐增大进水 COD 浓度, pH 值稳定在 7 以上, 最终进水 COD 维持在 800 mg/L 左右, 随着驯化的进行, 污泥逐渐适应水质和水量的变化, 56 d 后, 出水 COD 基本维持在 40 mg/L 以下, COD 去除率达到 95% 以上。

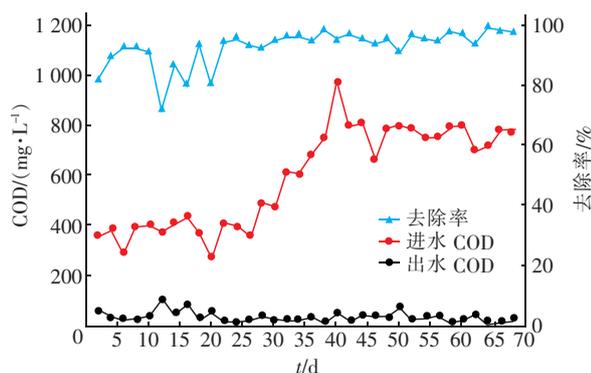


图4 MBR启动期间COD的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of COD during MBR start-up

图5是 MBR 启动驯化期间 UV_{254} 的变化。

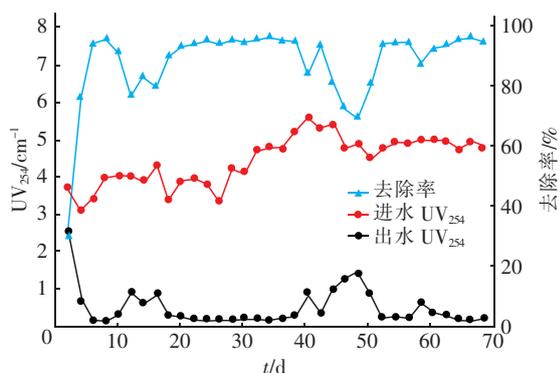


图5 MBR启动期间 UV_{254} 的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of UV_{254} during MBR start-up

启动初期, 出水 UV_{254} 很高。第 8~14 天 UV_{254} 出现波动。随着驯化的进行, 出水 $UV_{254} < 0.5 \text{ cm}^{-1}$ 并趋于稳定, UV_{254} 去除率稳定在 90% 以上。由于第 26~50 天进水有机物浓度增大, MBR 池内活性污泥

处于适应阶段, 出水 UV_{254} 值发生波动。第 58 天后 UV_{254} 去除率较高, 出水 UV_{254} 稳定。

2.1.2 工艺参数优化

① HRT

根据工艺情况调整 HRT 分别为 6、8、10 和 12 h, 研究不同 HRT 条件下焦化废水的处理效果, 结果如图 6 所示。

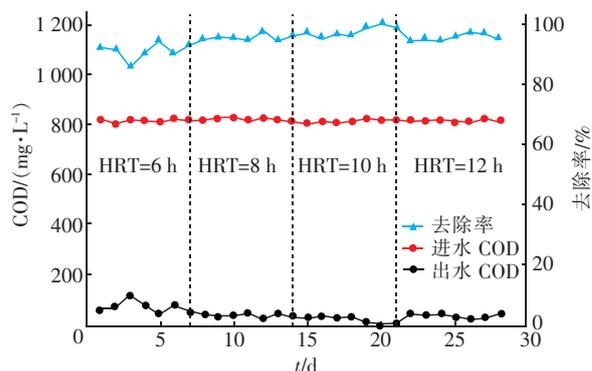


图6 不同HRT对COD去除效果的影响

Fig. 6 Effect of different HRT on COD removal efficiency

由图 6 可知, 在进水 COD 浓度为 810 mg/L 的条件下, 当 HRT 为 8、10 和 12 h 时, 系统对 COD 的去除效果较好, 出水浓度可达标; 当 HRT 为 6 h 时, 出水 COD $> 50 \text{ mg/L}$ 。分析原因, 在进水浓度一定的条件下, 缩短水力停留时间, 就增大了系统的有机负荷, 活性污泥中的微生物对有机物的分解代谢作用有限, 从而导致出水中的有机物增多, COD 浓度上升。当 HRT 为 10 h 时, COD 去除率能够达到 100%, 处理效果最佳。

在进水 UV_{254} 为 5.0 cm^{-1} 左右条件下, 当 HRT 为 10 和 12 h 时, 系统对 UV_{254} 的去除效果较好, 去除率能够达到 91%; 当 HRT 为 6 和 8 h 时, 系统对有机物的去除效果较差, 出水 UV_{254} 值多在 1.0 cm^{-1} 以上, 去除率大都低于 80%, 分析原因同上。综上, 确定最佳 HRT 为 10 h。

② DO 浓度

根据上述实验结果, 设置 HRT 为 10 h, 在进水 COD 为 810 mg/L 的条件下, 将 DO 浓度分别设置为 1.5~2.0、2.0~2.5、2.5~3.0、3.0~3.5、3.5~4.0、4.0~4.5、4.5~5.0、5.0~5.5、5.5~6.0 mg/L, 考察不同 DO 浓度对有机污染物去除效果的影响, 结果见图 7。在 DO 浓度逐渐增大的过程中, 除 DO 浓度在 2.0~2.5 mg/L 时, 对 COD 的去除效果有波动, 出水 COD 达到 43.2 mg/L, 其余 DO 浓度范

围内出水 COD 浓度均在 20 mg/L 以下, COD 去除率达到 97% 以上, 去除效果良好。其中, 当 DO 浓度为 3.0 ~ 4.0 mg/L 时, COD 去除效果最佳, 去除率为 100%。另外, 在进水 UV_{254} 值为 5.0 cm^{-1} 左右的条件下, 当 DO 浓度在 1.5 ~ 6.0 mg/L 范围内变化时, 出水 UV_{254} 值始终低于 0.5 cm^{-1} , 去除率能够达到 90% 以上, 有机物去除效果良好。综上, 确定最佳 DO 浓度为 3.0 ~ 3.5 mg/L。

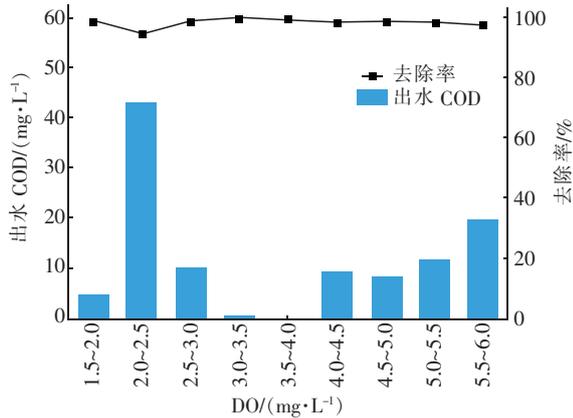


图7 DO浓度对COD去除效果的影响

Fig. 7 Effect of DO concentration on COD removal efficiency

2.2 “互联网+”焦化废水处理监控系统

2.2.1 焦化废水处理监控系统模型的构建

本研究构建了“互联网+”焦化废水处理监控系统, 根据物联网发展的前沿技术并结合各模型体系的优点, 针对焦化废水处理构建了智慧污水监控平台模型, 包括感知层、传输层、管理层和用户层, 如图8所示。

感知层是基于传感器网络的数据采集层, 主要功能是智能感知、信息采集和自动控制, 利用布置的各类传感器, 对污水处理进程中各个环节的水质、水量参数和执行设备开关状态参数进行实时在线监测, 并通过传输层将传感器采集的数据信息压缩融合, 依靠无线网络进行传输, 上传至管理层。管理层即云服务器, 建立系统组态、数据库和相关软件, 对收集的数据进行分析处理, 通过海量信息的解析, 得到智能化的决策和控制, 并反馈到实验主体设备, 控制工艺设施运行; 同时提供应用服务接口和网络控制接口, 直接向客户端推送实时监测数据和控制方案服务。依靠管理层的数据中心, 将在线监测数据进行解析、清洗、存储和分析; 数据中心包括数据集成系统和数据管理系统, 数据集成系统对传输数据

进行实时存储入库并清洗掉无效数据; 数据管理系统集成分析与控制模型, 对污水设施的水质水量监测数据、执行设备状态数据和视频数据进行分析处理, 计算得到最佳工艺控制参数并输出至数据采集与执行机构控制设备。应用平台包括工艺监控管理系统、报警管理系统和表务管理系统: 工艺监控管理系统通过调取数据管理阶段的执行设备状态数据, 进行业务化应用, 同时通过无线和有线方式向移动终端和固定终端推送可视化数据; 报警管理系统通过调取水质水量监测数据、视频数据, 进行报警业务化应用, 同时通过无线和有线方式向移动终端和固定终端推送报警信息; 表务管理系统调取数据管理阶段的水质水量监测数据和执行设备状态数据, 进行业务化应用, 同时通过无线和有线方式向移动终端和固定终端推送服务。用户层是物联网模型中的最高层次, 是集成化应用的核心, 是物联网智慧控制平台功能展示的窗口, 通过建立固定终端和移动终端向用户提供在线监控等服务功能。

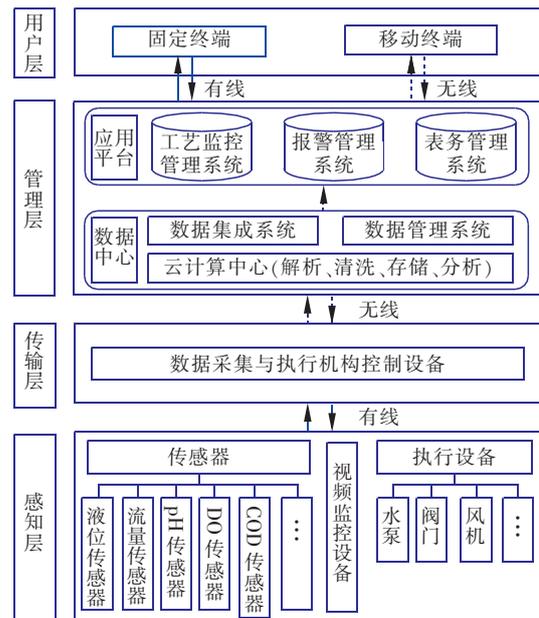


图8 互联网组织架构

Fig. 8 Internet organization structure

2.2.2 焦化废水处理水质预测模型的构建

有研究表明, 在污水生化处理过程中, 还原态有机污染物被逐渐氧化分解, 相应地, ORP 在有机物降解过程中也会逐渐升高, 氧化态有机物为正数, 还原态有机物为负数^[11]。通过对 ORP 传感器数据的收集整理分析, 与 COD 手动监测数据相结合, 探索

出水 ORP 与 COD 之间的关系(见图 9),以期用 ORP 指标反映 COD 变化趋势,从而有效监控 MBR 工艺运行。

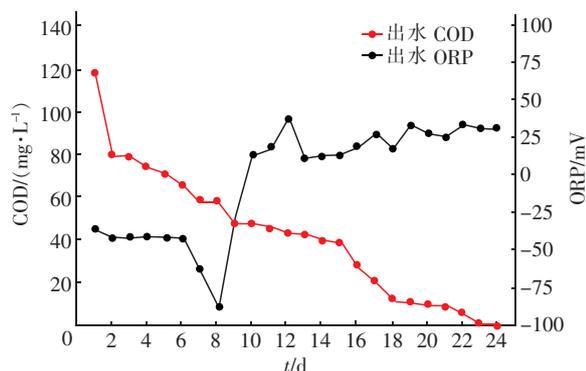


图 9 出水 COD 和 ORP 的对应关系

Fig. 9 Corresponding relationship of effluent COD and ORP

由图 9 可知,在进水 COD 为 810 ~ 830 mg/L、ORP 为 10 ~ 30 mV 的条件下,云平台监测数据显示出水 COD 和 ORP 指标有较为明显的相关性,当出水 COD > 45 mg/L 时,ORP < 0 mV,当出水 COD < 45 mg/L 时,ORP > 0 mV,而且出水 COD 浓度越低,ORP 值就越高。ORP 是用来反映水质的宏观氧化还原性,氧化还原电位越高,氧化性越强;氧化还原电位为负时,水质呈现还原性。在生化系统中,随着出水 COD 浓度的降低,系统对 COD 的去除率逐渐增加,氧化态有机物增多,出水 ORP 值也随之上升,ORP 值越高,说明系统对有机物去除得越彻底。由此,可通过云平台的 ORP 监测数据反映出出水 COD 指标,预估 MBR 对有机物的去除效果:当 ORP > 0 mV 时,出水 COD 浓度能够达标,且 ORP 值越大,系统的处理效果越好;当 ORP < 0 mV 时,出水 COD 浓度不能达标。

本研究采用多元线性回归方法,在数据库中随机抽取 36 组参数值(ORP、DO、HRT 和 pH 值)进行建模。基于参数进行计算分析提出了预测 ORP 的模型,如式(1)所示。

$$Y = -2.4096A + 15.3534B + 20.4265C - 247.041 \quad (1)$$

式中:Y 为 ORP, mV; A 为 DO, mg/L; B 为 HRT, h; C 为 pH 值。

① 模型预测结果

DO、HRT 和 pH 值对 ORP 的模型计算值的散点分布如图 10 所示。可以看出,实验值和模型计算值

的拟合效果较好,吻合度较高,大多数点都能够均匀分布在对角线的两侧,模型的统计结果 $R^2 = 0.837$,表明所建立的模型准确度较高。

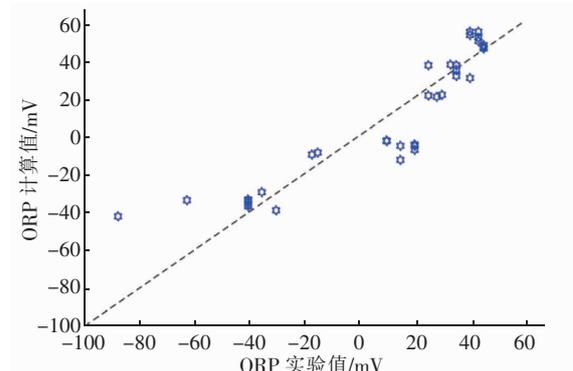


图 10 ORP 实验值与预测值

Fig. 10 Scatter diagram of experimental and predicted ORP values

② 内部验证

内部验证是一种应用比较广泛的方法,多用来验证模型的稳定性,在本研究中,采用留一法对实验模型进行内部验证,经过计算得到的 LOO CV 模型预测值与实验值如图 11 所示。模型统计结果 $Q^2 = 0.796$,表明本研究所建立的 ORP 预测模型稳定性较高。

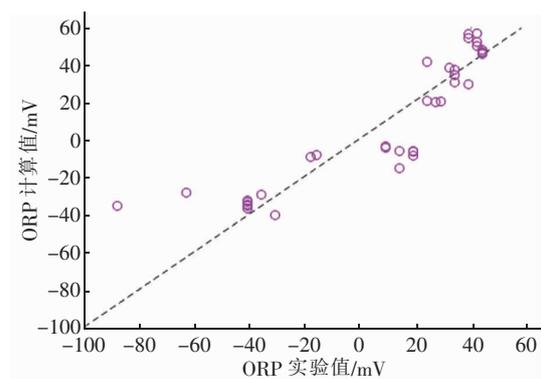


图 11 内部验证结果

Fig. 11 Internal verification diagram

2.2.3 监控与预警实现

通过研发“互联网+”监控系统,与焦化废水处理工艺进行匹配,实现对数据的高效采集、快速分析和远程监控,并集成化至固定终端和移动终端。本系统具有智能监控、智能预警、数据输出等功能。

① 智能监控

水质参数实时监控:利用在一体化污水处理设备布设的各类传感器,对污水处理进程中各个环节

的指标参数(pH 值、DO 浓度、ORP 和液位)进行实时在线监测,以历史曲线图的形式对数据进行显示和记录。

根据水质指标和工艺变化情况,系统可切换自动手动模式对 MBR 工艺运行进行控制,如图 12 和图 13 所示,当 DO 和 ORP 值变化时,根据输入数据进行计算得到最佳控制指令并输出,控制曝气泵 A 和 B 的启闭以及进出水泵的转速,设备工艺状态可以在固定端和移动端进行展示。



图 12 固定端智能监控

Fig. 12 Intelligent monitoring of fixed terminal



图 13 移动端智能监控

Fig. 13 Intelligent monitoring of mobile terminal

② 智能预警

在程序设计时,根据曝气风机等设备运行状态设置状态信息推送,显示此时的设备运行情况。但是在实际工作中,语言文字信息推送比状态信息更加直观,更具有便捷性,所以根据曝气风机和进出水泵的综合运行状态设置报警信息。当 DO 浓度 > 6.0 mg/L 时,向用户端推送报警信息“曝气量过大”,在实际过程中,当进水泵开启时,MBR 池体中的活性污泥微生物在有氧环境下会将进水中的有机物氧化分解成小分子物质,在这个过程中,DO 浓度会迅速下降至 6.0 mg/L 以下,所以在当前曝气状态

下,影响 DO 浓度的不仅仅是曝气状态,还有进水泵的影响,需要开启进水泵使焦化废水处理系统运转,所以在 DO 浓度超过 6.0 mg/L 时,将系统报警信息优化调整为“需要开启进水泵”。

目前我国大部分监控系统的集成式智能化程度相对较低,无论现场执行对象为何种设备,都只能现场人机交互操作管理或固定空间远程管理,操作便利性、灵活性相对较低^[12]。而本研究的“互联网+”焦化废水处理监控系统能够将数据采集、传输、分析集成一体,并利用阿里云服务平台进行智能管理,实现实时监测、智能监控、权限管理、智能预警、历史记录、多用户管理、数据查询和数据输出等多种功能,用户可以在移动终端和固定终端利用无线网络和有线方式对工艺进行远程控制,操作简单,便于管理。

3 结论

① 采用 MBR 处理模拟焦化废水,经过连续 70 d 的培养驯化实验,COD 等出水指标稳定达标,处理效果较好;当进水 COD 为 810 mg/L、UV₂₅₄ 为 5.0 cm⁻¹时,在 HRT 为 10 h、DO 为 3.0 ~ 3.5 mg/L 的优化条件下,COD 和 UV₂₅₄ 去除率分别可以达到 100% 和 91%,出水水质能达标排放。

② 开发的“互联网+”焦化废水处理监控系统,能够根据 MBR 池内的 DO 和液位变化情况控制曝气风机启闭以及进出水泵的转速,对焦化废水处理工艺进行监测和控制。

③ 将提出的 ORP 预测模型应用于焦化废水处理监控过程,准确度较高,稳定性较好,可用于本工艺云服务平台的报警管理系统以及工艺监控管理系统的运行管理过程,简化实验过程,使生产管理过程更加科学高效,实现远程控制,为焦化废水处理工艺的运行控制提供参考和依据。

参考文献:

- [1] CHU L, WANG J, DONG J, *et al.* Treatment of coking wastewater by an advanced Fenton oxidation process using iron powder and hydrogen peroxide [J]. *Chemosphere*, 2012, 86(4): 409-414.
- [2] 邢林林, 张景志, 姜安平, 等. 焦化废水深度处理技术综述[J]. *工业水处理*, 2017, 37(2): 1-6.
XING Linlin, ZHANG Jingzhi, JIANG Anping, *et al.* Summary on the advanced treatment technology of coking wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(2): 1-6 (in Chinese).

- [3] 李欢,陶若虹,孙斌,等. 焦化废水处理工程设计实例及运行效果[J]. 中国给水排水,2018,34(4):97-101.
LI Huan,TAO Ruohong,SUN Bin, *et al.* Case study on design and operation of a coking wastewater treatment project[J]. China Water & Wastewater,2018,34(4):97-101(in Chinese).
- [4] 张万辉,韦朝海. 焦化废水的污染物特征及处理技术的分析[J]. 化工环保,2015,35(3):272-278.
ZHANG Wanhui,WEI Chaohai. Analysis of pollutant characteristics and treatment technologies of coking wastewater[J]. Environmental Protection of Chemical Industry,2015,35(3):272-278(in Chinese).
- [5] 俞彬,刘凯男,刘秦安,等. 煤化工废水深度处理及回用工程实例[J]. 水处理技术,2018,44(3):136-139.
YU Bin,LIU Kainan,LIU Qin'an, *et al.* Engineering example of advanced treatment and reuse of coal chemical wastewater [J]. Technology of Water Treatment,2018,44(3):136-139(in Chinese).
- [6] 王姣,于冰,孙黎明. 基于序批式 MBR-RO 的焦化废水深度处理研究[J]. 水处理技术,2014,40(4):95-98.
WANG Jiao,YU Bing,SUN Liming. Study on advanced treatment of coking wastewater by sequencing batch MBR-RO[J]. Technology of Water Treatment,2014,40(4):95-98(in Chinese).
- [7] 孙艳,王浩昌,赵冬泉,等. 基于物联网的污水处理厂无人值守管理模式探讨[J]. 中国给水排水,2015,31(22):18-21.
SUN Yan,WANG Haochang,ZHAO Dongquan, *et al.* Discussion on WWTP unattended management mode based on IOT system[J]. China Water & Wastewater,2015,31(22):18-21(in Chinese).
- [8] 刘嘉夫,齐昕,张国利. 重庆市污水处理厂融合物联网的自动控制应用[J]. 工业水处理,2015,35(12):106-108.
LIU Jiafu,QI Xin,ZHANG Guoli. Application of automatic control combined with the internet of things in a Chongqing wastewater plant [J]. Industrial Water Treatment,2015,35(12):106-108(in Chinese).
- [9] 武志伟,赵振忠,韩文杰,等. 物联网通讯技术在污水处理自动化系统中的应用[J]. 工业水处理,2019,39(1):108-109,112.
WU Zhiwei,ZHAO Zhenzhong,HAN Wenjie, *et al.* Application of IOT (internet of things) technology to the wastewater treatment automatic control system [J]. Industrial Water Treatment,2019,39(1):108-109,112(in Chinese).
- [10] 赵胜楠,高会杰,赵天楚. 硝化菌耐盐驯化及处理高含盐氨氮废水实验研究[J]. 水处理技术,2017,43(3):56-58,63.
ZHAO Shengnan,GAO Huijie,ZHAO Tianchu. Experimental study on salt tolerant acclimation of nitrifying bacteria and treatment of ammonia nitrogen wastewater containing high salt[J]. Technology of Water Treatment,2017,43(3):56-58,63(in Chinese).
- [11] 高景峰,彭永臻,王淑莹,等. 以 DO、ORP、pH 控制 SBR 法的脱氮过程[J]. 中国给水排水,2001,17(4):6-11.
GAO Jingfeng,PENG Yongzhen,WANG Shuying, *et al.* Using dissolved oxygen,oxidation reduction potential and pH value for control nitrogen removal in SBR process [J]. China Water & Wastewater,2001,17(4):6-11(in Chinese).
- [12] 胡立鹏. 基于云平台的手机远程监控污水处理系统设计[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
HU Lipeng. Design of Mobile Phone Remote Monitoring Wastewater Treatment System Based on Cloud Platform [D]. Wuhan:Hubei University of Technology,2019(in Chinese).

作者简介:杨宗政(1974-),男,满族,河北易县人,博士,教授,主要从事环境应急处理和生物强化技术在污水、污泥治理及其资源化方面的应用以及土壤生物修复的研究。

E-mail: yzz320@tust.edu.cn

收稿日期:2020-09-25

修回日期:2020-12-18

(编辑:刘贵春)